

VŠB – Technická universita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Fyzikální model pro simulaci přechodných dějů při
vypínání.
Physical model for simulation of transient effects in the
course of switching off.

Zadání:

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Jiří Ošlejšek

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Fyzikální model pro simulaci přechodných dějů při vypínání.
Physical model for simulation of transient effects in the course of
switching off.

Zásady pro vypracování:

1. Rozeberte problematiku řešení přechodných dějů při vypínání, definujte pojmy jako obnovené a zotavené napětí.
2. Definujte podmínky pro fyzikální simulaci přechodových dějů při vypínání.
3. Realizujte fyzikální model použitelný v laboratorní výuce.
4. Realizujte experimentální měření pro zadaný případ průběhu zotaveného napětí a porovnejte výsledky simulace s teoretickým výpočtem včetně závěrů pro zdůvodnění odchylek.

Seznam doporučené odborné literatury:


Dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

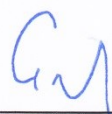
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V BLANSKU 6.5.2013

Místo a datum

Jiří Ošlejšek

Podpis
Jiří Ošlejšek

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Hytkovi, CSc., za poskytnuté cenné rady.

Abstrakt

Obsahem bakalářské práce je výroba fyzikálního modelu pro simulaci přechodných dějů při vypínání. V práci bude řešen teoretický rozbor přechodných jevů a praktické řešení návrhu a výroby indukční a kapacitní dekády. V první části rozeberu teoretické výpočty, ze kterých budu postupovat v řešení problému. V druhé části provedu řešení tvorby vlastního fyzikálního modelu. Dalším postupem je výběr vhodného materiálu na výrobu dekád, který ovlivňuje celý fyzikální model. Fyzikální model bude řešen z hlediska indukční a kapacitní dekády. Mezi mé úkoly patří celková výroba z hlediska konstrukčního i materiálového s přihlédnutím na požadavky specifikace fyzikálního modelu. V poslední části se budu zabývat vlastním měřením na fyzikálním modelu v laboratoři a zhodnocením vlastních změřených výsledků.

Klíčová slova

Fyzikální model, simulace, přechodný děj, kapacitní dekáda, indukční dekáda, obnovené napětí, zotavené napětí, frekvenční obvod, feritové jádro, keramické kondenzátor.

Abstrakt

The content of this bachelor's thesis is the manufacture of a physical model for the simulation of transients during the shutdown. The work will be dealing with theoretical analysis of transient phenomena and practical solutions of design and manufacture of inductive and capacitive decades. In the first part I will discuss the theoretical calculations, from which I will proceed in solving the problem. In the second part I will also resolve creation of the physical model. Another procedure is to select a suitable material for the manufacture of decades, which affects the entire physical model. The physical model will be solved in terms of inductive and capacitive decades. The tasks include complete manufacture in terms of design and materials, taking into account the requirements of the specification of a physical model. In the last section, I will discuss the measurement on a physical model in the laboratory and evaluation of measured results.

Key words

Physical model, simulation, transient, capacitive decade, induction decade, restored voltage, recovery voltage, frequency circuit, ferrite core, ceramic capacitor

Seznam použitých symbolů a zkratek

u	napětí zdroje (okamžitá hodnota) [V]
U_m	maximální hodnota napětí [V]
ω	uhlová frekvence obvodu [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
t	čas [s]
ϕ	fázový posun [$^\circ$]
U	napětí zdroje [V]
L	indukčnost [H]
C	kapacita [F]
u_C	okamžitá hodnota napětí na kondenzátoru [V]
R	rezistivita [Ω]
U_0	napětí zdroje [V]
u_{Kid}	napětí na kontaktech (okamžitá hodnota) [V]
a_{id}	charakteristický kořen rovnice reálný [-]
b_{id}	charakteristický kořen rovnice reálný [-]
ω_{rid}	ideální úhlová rezonanční frekvence [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
f_{rid}	ideální kmitočtová frekvence [Hz]
s_{id}	střední strmost nárůstu zotaveného napětí [-]
$U_{\text{Kid max}}$	maximální hodnota napětí v čase $t_{\text{l max}}$ [V]
$t_{\text{l max}}$	čas v kterém dosáhne napětí maxima [s]
f_A	vlastní frekvence obvodu A [Hz]
f_B	vlastní frekvence obvodu B [Hz]
L_A	indukčnost obvodu A [H]
L_B	indukčnost obvodu B [H]
C_A	kapacita obvodu A [F]
C_B	kapacita obvodu B [F]
n_0	činitel závislosti poměru [-]
m_0	činitel závislosti poměru [-]
K_S	činitel sloužící pro výpočet náhradní frekvence f_S a f_R [-]
f_S	náhradní frekvence odvodu A [Hz]
f_R	náhradní frekvence odvodu B [Hz]
J_R	činitel sloužící k výpočtu náhradní indukčnosti obvodu A [-]
J_S	činitel sloužící k výpočtu náhradní indukčnosti obvodu B [-]
L_R	náhradní indukčnosti obvodu A převedena na kruhovou [H]
L_S	náhradní indukčnosti obvodu B převedena na kruhovou [H]
L^*	náhradní indukčnost pro obvod se soustředěnými parametry [H]
C^*	náhradní kapacita pro obvod se soustředěnými parametry [F]
Y	admitance obvodu [S]
Y^*	admitance náhradního obvodu [S]
A	energetický obsah [J]
RM	RM jádro (Rectangular – Modul – Cores) druh normalizovaného jádra

Obsah

1	Úvod	1
2	Základní pojmy	2
3	Teoretické výpočty	3
3.1	Popis složek zotaveného napětí	3
3.2	Frekvenční obvody	4
3.2.1	Jednofrekvenční obvod	4
3.2.2	Dvojfrekvenční obvod	6
3.2.3	Trojfrekvenční obvod	8
3.3	Náhradní parametry obvodu	8
3.3.1	Popis výpočtové metody rovnosti admitancí	8
3.3.2	Popis metody výpočtu rovnosti vlastních kmitočtů	9
3.3.3	Popis výpočtu metody rovnosti energetických obsahů	10
4	Fyzikální model	11
4.1	Materiály pro výrobu dekád	11
4.1.1	Materiál pro indukční dekádu	11
4.1.2	Materiál pro kapacitní dekádu	13
4.2	Průmyslově vyráběné dekády	14
4.2.1	Indukční dekáda	14
4.2.2	Kapacitní dekáda	15
4.3	Návrh a realizace dekády	15
4.3.1	Indukční dekáda	15
4.3.2	Kapacitní dekáda	17
4.3.3	Příslušenství pro měření	18
5	Měření	20
5.1	Jednofrekvenční obvod	20
5.2	Jednofrekvenční obvod s tlumícím rezistorem	22
5.3	Dvojfrekvenční obvod s zátěží	24
5.4	Dvojfrekvenční obvod s rozloženým napětí podél sítě	26
6	Závěr	28
	Seznam použité literatury	29

1. Úvod

I dnes s rostoucím rozvojem simulačních programů, které jsou schopny simulovat velmi rozsáhlé a složité obvody, je stále velmi důležité si ověřovat simulované průběhy hodnot na reálném modelu. Bez této možnosti nelze ověřovat teoretické znalosti v praxi. Nejdůležitější přínos bude v oblasti testování a výuky.

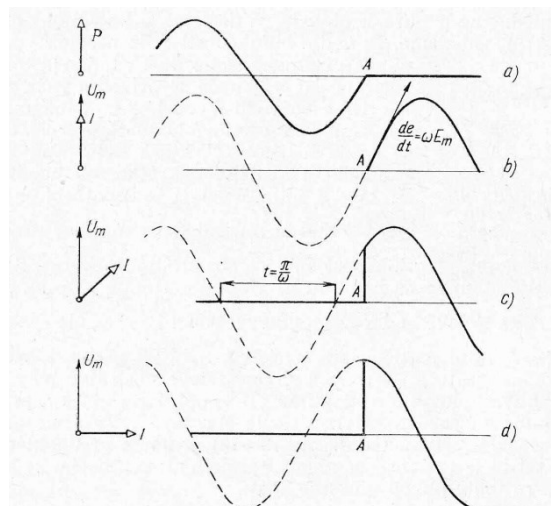
Postupem doby se přechází na školách z důvodu úspor k menší praxi v laboratořích. Ale zvyšuje se počet výukových hodin v interaktivních učebnách s různými interaktivními simulačními programy, které plnohodnotně nahradí laboratorní měření, ale student nemá příliš praktických zkušeností.

Hlavním důvodem této práce je, aby student byl schopen vypočítat obvodové hodnoty a měřením si je jen ověřit. Tento přístup přináší mnoho výhod od simulačních programů.

V bakalářské práci se zabývám problematikou vytvoření fyzikálního modelu, se kterým by bylo možno vytvořit i trojfrekvenční obvody, bez nutnosti složitého výpočtu. Výpočet trojfrekvenčního obvodu je tak složitý a nepřesný, že s výhodou přesnosti je lépe jej měřit v laboratoři. K měření bude jen zapotřebí indukční a kapacitní dekády, zdroj nízkého napětí, spínací prvek, v našem případě usměrňovací dioda (případně paralelně připojený spínač s tlumícím odporem) a osciloskop.

2. Základní pojmy

„Základní rozdíl mezi vypínáním stejnosměrného a střídavého proudu je v tom, že u stejnosměrného proudu musíme ve zhášedle vypínače zničit všechnu energii nahromaděnou v indukčnostech obvodu, kdežto střídavého proudu dojde k vypnutí vždy v nule proudu, takže v tomto okamžiku je energie v indukčnostech nulová. Proto je vypínání střídavého proudu vždy mnohem snadnější nevypínání proudu stejnosměrného. Fázové posunutí mezi vypínaným proudem a napětím zdroje může být obecně různé podle toho, do jakého zatížení generátor pracuje. Proto také okamžitá velikost napětí v okamžiku, kdy proud dospěje k nule a oblouk uhasne, je mezi nulou a největší výchylkou napětí podle fázového posunutí proudu. Na obr. 1 jsou naznačeny tři případy průběhu napětí (b, c, d) při proudu I naznačeném v obrázku 1a.“ [1]



Obr. 1 Vliv účinníku na velikost počáteční hodnoty zotaveného napětí. [1]

Na obr. 1 je nejlépe možno popsat celý problém s řešením vypínání střídavého napětí. Průběh proudu je zobrazen na obr. 1a a tento proud využijeme ve zbývajících obr. 1b,c,d. Ve všech průbězích se posouvá napětí vůči proudu. Proud je vypínán vždy v nule proto je možné všechny průběhy považovat za ideální.

Druhým případem, pro nás zajímavějším je, že průběh napětí je v nule a proud je v maximu. Při tomto případě je energie v induktoru maximální a vypínač musí tuto energii zničit. Pokud vypínač tuto energii nedokáže zničit, oblouk neuhasne a vypínač se poškodí nebo zničí.

V této práci se dále budu zabývat zotaveným napětím. Při nejhorších případech, kdy je přerušen proud v maximu.

3. Teoretické výpočty

Teoretický výpočet lze rozdělit na několik samostatných bloků, které na sebe navzájem navazují a souvisí.

Nejdříve musíme zjistit hodnoty indukčnosti a kapacit jednou z metod nebo zadáním. Poté přistoupíme k výpočtu zotaveného napětí.

Pro pochopení vlastního výpočtu je ale lépe začít s výpočtem zotaveného napětí, z důvodu lepšího pochopení zadaného problému.

3.1 Popis složek zotaveného napětí

Napětí, které se objeví po rozpojení obvodu na kontaktech vypínače, se nazývá zotavené napětí. Zotavené napětí se skládá ze dvou složek:

- a) Přechodná složka zotaveného napětí
- b) Obnovené napětí

Přechodná složka zotaveného napětí

Při vypnutí v ustáleném stavu, přechází obvod do nového ustáleného stavu. Doba mezi přechody ustálených stavu se nazývá přechodná složka zotaveného napětí. Přechodná složka zotaveného napětí se určuje z parametrů obvodu nebo měřením.

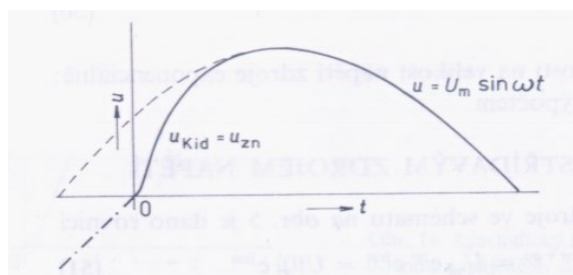
Obnovené napětí

Obnovené napětí stanovíme z ustálených hodnot obvodových prvků. Výpočet obnoveného napětí je možný z hodnot zdroje napětí a impedance obvodu.

Charakteristické průběhy ideálního zotaveného napětí s napájením střídavým napětím můžeme rozdělit do 3 skupin:

a) Aperiodický průběh

Aperiodický průběh není příliš zajímavý a ani příliš vhodný z hlediska elektrického vypínání. Aperiodický průběh ideálního zotaveného napětí je zobrazen na obr. 2



Obr. 2 Aperiodický průběh ideálního zotaveného napětí obvodu napájeného střídavým napětím [2]

b) Mezní případ aperiodického a periodického průběhu

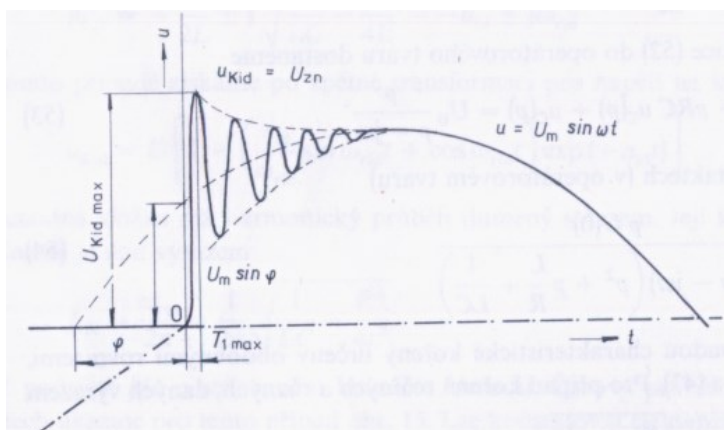
Mezní průběh je z hlediska zkoumání velmi zajímavý a stejně důležitý je i při reálném vypínání elektrických obvodů.

Mezní případ průběhu je zobrazen na obr. 3

c) Periodický průběh

Periodický průběh je nejméně oblíbený z důvodu možnosti obnovení oblouku mezi kontakty. A tím je nutné navýšení pevnosti mezi kontakty.

Periodický průběh je zobrazen na obr. 3 s podmínkou, že se hodnota přechodné složky nikdy neustálí.



Obr. 3 Periodický průběh ideálního zotaveného napětí obvodu napájeného střídavým napětím [2]

3.2 Frekvenční obvody

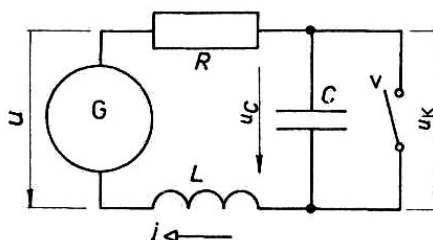
Z pohledu problematiky řešení výpočtu vypínání střídavého napětí a jeho porovnávání. Patří mezi nejdůležitější stanovení vlastních frekvencí obvodu. Pokud je počet vlastních frekvencí příliš velký, často je zjednodušován. Proto si často zjednodušujeme výpočet a volíme co nejvíce zjednodušené obvody.

Frekvenční obvody dělíme z hlediska vlastních kmitočtů na:

- a) jednofrekvenční obvody
- b) dvoufrekvencí obvody
- c) třífrekvencí a více frekvencí obvody

3.2.1 Jednofrekvenční obvod

„Předpokládejme, že napětí zdroje ve schématu na obr. 4 je dáno rovnicí (1) a že vypnutí provedeme ideálním vypínačem.“ [2]



Obr. 4 Náhradní schéma sítě se soustřednými parametry [2]

Napětí zdroje

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m e^{j(\omega t + \varphi)} = U_m e^{j\varphi} e^{j\omega t} = U(0) e^{j\omega t} \quad (1) [2]$$

Diferenciální rovnici obvodu s ideálním vypínačem vyjádříme pomocí rovnice (2)

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U(0) e^{j\omega t} \quad (2) [2]$$

Operátorový tvar získáme transformací diferenciální rovnice (2)

$$p^2 LC u_C(p) + pRC u_C(p) + u_C(p) = U_0 \frac{p}{p - j\omega} \quad (3) [2]$$

Napětí na kontaktech v operátorovém tvaru

$$u_C(p) = \frac{pU(0)}{LC(p - j\omega)(p^2 + p\frac{R}{L} + \frac{1}{LC})} \quad (4) [2]$$

Napětí na kontaktech aperiodického průběhu zjistíme zpětnou transformací rovnice (6)

$$u_{Kid} = U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m \sin \varphi \left(\frac{a_{id}}{b_{id}} \sinh b_{id} t + \cosh b_{id} t \right) \exp(-a_{id} t) \quad (5) [2]$$

Rovnice (5) charakterizuje průběh aperiodický. Aperiodický průběh je zobrazen na obr. 2.

Výpočet kořenů charakteristické rovnice

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = a_{id} \pm b_{id} \quad (6) [2]$$

Napětí na kontaktech periodického a mezního periodického průběhu

$$u_{Kid} = U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m \sin \varphi \left(\frac{a_{id}}{\omega_{rid}} \sin \omega_{rid} t + \cos \omega_{rid} t \right) \exp(-a_{id} t) \quad (7) [2]$$

Výpočet komplexně sdružených kořenů charakteristické rovnice

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = -a_{id} \pm j \omega_{rid} \quad (8) [2]$$

„Je-li splněna podmínka $R^2/4L^2 < 1/LC$, dostaneme charakteristické kořeny komplexně sdružené“ [2]

„V případě, že $R^2/4L^2 = 1/LC$, vyplývá že (8) jediný dvojitý kořen a přechodná složka pak má exponenciální průběh. Je to mezní případ mezi průběhem kmitavým a aperiodickým.“ [2]

Výpočet ideální úhlové rezonanční frekvence obvodu

$$\omega_{rid} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (9) [2]$$

„Dosti často bývá splněna podmínka, že $R \ll L$. V tomto případě se rovnice (9) zjednoduší na“ [2]

vztah (10)

Výpočet ideální úhlové rezonanční frekvence obvodu

$$\omega_{rid} \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10) [2]$$

Výpočet ideálního kmitočtu přechodné složky

$$f_{rid} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11) [2]$$

„Ideální zotavené napětí je tedy jednou z veličin, které charakterizují obvod při vypínacím ději.

Abychom mohli porovnat obtížnost vypnutí ve dvou různých obvodech (sítích), musíme především porovnat jejich ideální zotavená napětí. K usnadnění porovnání zavádíme parametry, které zotavené napětí charakterizují.

Jsou to : “ [2]

a) Výpočet kmitočtu přechodné složky

$$f_{rid} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (12) [2]$$

V případě zanedbání rezistence obvodu platí rovnice (11)

b) Výpočet střední strmosti nárůstu zotaveného napětí

$$s_{id} = \frac{U_{Kid \max}}{t_{1 \max}} \quad (13) [2]$$

Stanovení času $t_{1 \max}$ můžeme stanovit pomocí derivace rovnice (7) podle času se musí rovnat nule.

$$\frac{du_{Kid}}{dt} = 0 \quad (14) [2]$$

„Uvážíme-li, že ve skutečných případech bývají dobře splněny podmínky $\omega \ll \omega_{rid}$, $R \ll L \rightarrow a_{id} \rightarrow 0$, $a_{id}/\omega_{rid} \rightarrow 0$, stačí pro určení extrémů rovnice (7) derivovat člen s funkcí $\cos \omega_{rid} t$ (a položit rovný nule)“ [2]

$$\frac{d(-\cos \omega_{rid} t)}{dt} = \omega_{rid} \sin \omega_{rid} t = 0 \quad (15) [2]$$

Tato podmínka je splněna pro rovnici (15) pro nekonečně mnoho případů. Ale jak vyplývá z vlastního průběhu zotaveného napětí uvažujeme jen s jedním časem π/ω_{rid} . Pro tuto hodnotu je možné očekávat nejvyšší hodnotu napětí v čase.

$$\omega_{rid} t = 0; \pi; 2\pi; \dots$$

$$t = 0; \frac{\pi}{\omega_{rid}}; \frac{2\pi}{\omega_{rid}}; \dots \quad (16) [2]$$

„Maximální hodnoty dosáhne napětí v čase $t_{1\max}=\pi/\omega_{rid}$. Dosazením této hodnoty do rovnice (7) dostaneme po úpravě“ [2]

$$U_{Kid\ max} = U_m \sin\varphi - U_m \sin\varphi (-1) \exp\left(-\frac{a_{id}\pi}{\omega_{rid}}\right) = U_m \sin\varphi \left[1 + \exp\left(-\frac{a_{id}\pi}{\omega_{rid}}\right)\right] \quad (17) [2]$$

Střední strmost napětí v čase π/ω_{rid} lze zjednodušit na vztah (18)

$$s_{id} = \frac{U_{Kid\ max}}{t_{1\ max}} = \frac{U_m \sin\varphi \left[1 + \exp\left(-\frac{a_{id}\pi}{\omega_{rid}}\right)\right]}{\frac{\pi}{\omega_{rid}}} = \frac{2}{\pi} \omega_{rid} U_m \sin\varphi \quad (18) [2]$$

c) Výpočet překmitu

$$y_{id} = \frac{U_{Kid\ max}}{U_m \sin\varphi} \quad (19) [2]$$

Překmit určíme z maximální hodnoty zotaveného napětí $U_{Kid\ max}$ a z hodnoty obnoveného napětí.

V nejlepším případě nastane hodnota překmitu nejvýše dvojnásobku napětí zdroje.

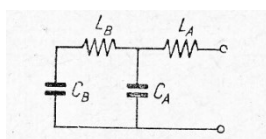
Pro tento případ vypočítáme hodnotu překmitu s využitím vzorce (17) a času $t_{1\max}=\pi/\omega_{rid}$ a získáme rovnici (20).

$$y_{id} = \frac{U_{Kid\ max}}{U_m \sin\varphi} = 1 + \exp\left(-\frac{a_{id}\pi}{\omega_{rid}}\right) = 2 \quad (20) [2]$$

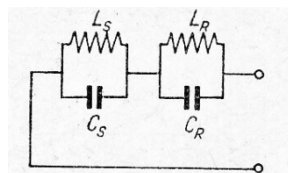
3.2.2 Dvojfrequenční obvod

Výpočet dvojfrequenčního obvodu je složitější oproti jednofrequenčnímu obvodu. Ale je velmi podobný jednofrequenčnímu obvodu.

Nejdříve stanovíme parametry obvodu stejného jako v případě jednofrequenčního obvodu podle obr. 5.



Obr. 5 Výpočet kmitočtu v dvojfrequenčním obvodu [1]



Obr.6 Dvojfrequenční obvody, rovnocenný obvodu podle obr.5 [1]

Výpočet vlastních frekvencí obvodu

$$f_A = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_A C_A}} \quad (21) [1]$$

$$f_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_B C_B}} \quad (22) [1]$$

Dalším krokem je zjištění činitele K_S .

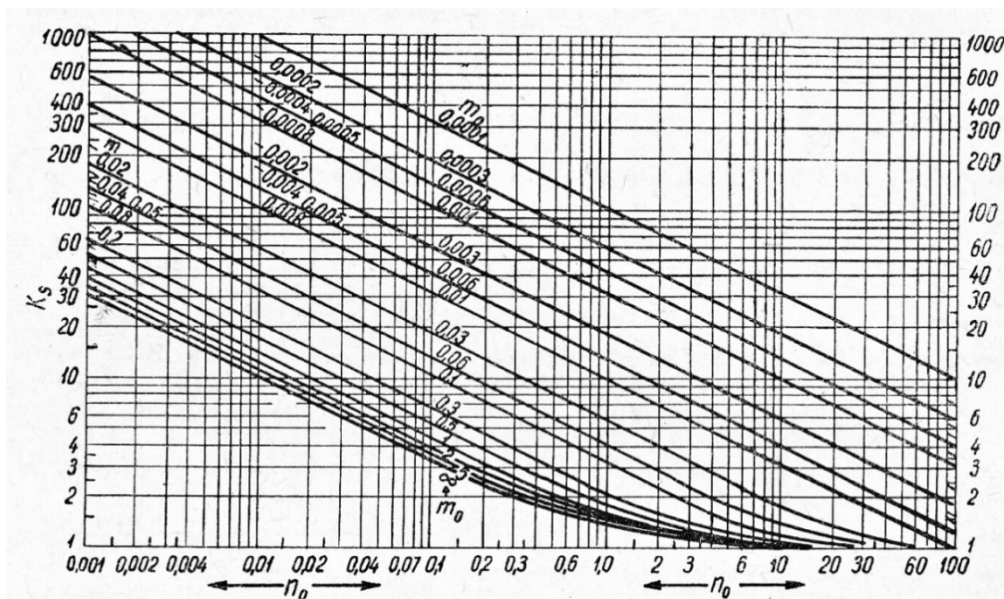
„Činitel K_S se přečte z diagramu na obr. 7 v závislosti na poměru“ [1]

Výpočet činitele n_0 a m_0

$$n_0 = \frac{L_B}{L_A} \quad (23) [1]$$

$$m_0 = \frac{C_B}{C_A}$$

Hodnotu K_S zjistíme odečtením složek n_0 a m_0 z diagramu obr. 7.



Obr. 7 Diagram pro zjištění hodnoty K_S [1]

Výpočet náhradní frekvence f_S a f_R

$$f_S = f_A K_S$$

$$f_R = \frac{f_B}{K_S}$$

(24) [1]

Dalším krokem je přepočet indukčnosti L_A a L_B na dva okruhy s indukčnostmi L_R a L_S .

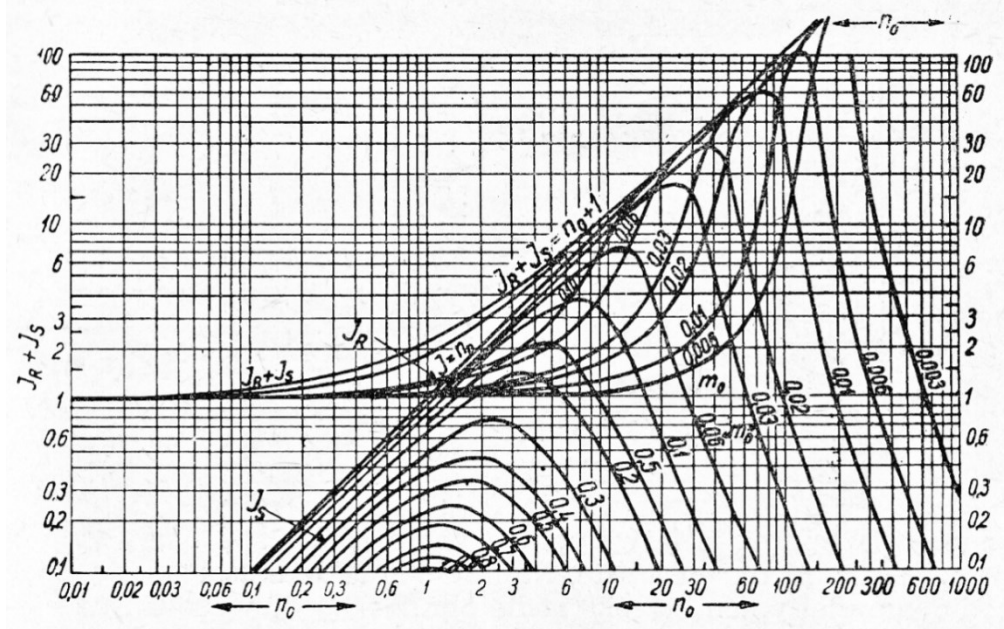
Hodnoty k přepočtu použijeme stejné s použitím vzorců (23). Z diagramu obr. 8 získáme hodnoty J_R a J_S . A ty dosadíme do vzorce (25).

Výpočet přepočítané indukčnosti L_R a L_S

$$L_R = J_R L_A$$

$$L_S = J_S L_A$$

(25) [1]



Obr. 8 Diagram pro zjištění hodnot J_R a J_S [1]

3.2.3 Trojfrekvenční obvod

„Byl vypracován také postup pro výpočet kmitočtů v obvodech s třemi vlastními kmitočty. (7 Ten však neuvádíme, neboť se ho používá jen málo a je dosti složitý.“ [1]

Výpočet je možno nalézt v knize „7)Hammarlund: CIGRE 1948, čís. 107.“ [1]

Trojfrekvenční obvody je lépe simulovat s využitím simulačních programů nebo s využitím fyzikálního modelu. Úkolem této práce je vytvoření fyzikálního modelu, kterým by bylo možné tyto průběhy simulovat a vyhodnocovat.

3.3 Náhradní parametry obvodu

„Protože nemůžeme ani prakticky, ani teoreticky provést přesný výpočet, musíme se uchýlovat k dalekosáhlému zjednodušení obvodu. Toto zjednodušení záleží ve dvou krocích; jsou to:

1. Náhrada rozložených indukčností a kapacit rovnocennými indukčnostmi a kapacitami soustředěnými;
2. Postupné zjednodušování takto získaného schématu na kmitavý okruh se dvěma, nejvýš třemi kmitočty.“ [1]

Náhrada rozložených parametrů za soustředěné parametry obvodu

Při náhradě parametrů obvodu budeme uvažovat jen s kapacitami a indukčnostmi z důvodu zjednodušení výpočtu.

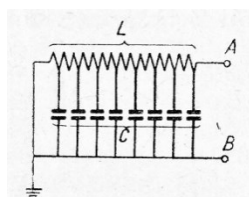
„Podle Wangerera a Browna můžeme při určování náhradních kapacit vycházet ze tří hypotheses:

1. Z rovnosti admitancí
2. Z rovnosti vlastních kmitočtů
3. Z rovnosti energetických obsahů.“ [1]

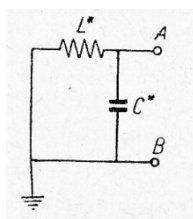
3.3.1 Popis výpočtové metody rovnosti admitancí

Princip rovnosti admitancí je založen na náhradě rozložených parametrů za soustředěné parametry.

Na obr. 9 je schéma obvodu s rozloženými parametry. Jak je patrné z obvodového schématu, je obvod tvořen mnoha frekvenčními obvody. Hlavním úkolem náhrady je nahrazení rozložených parametrů co nejpřesnějším modelem s soustřednými parametry. Náhradní schéma obvodu je na obr. 10.



Obr. 9 Schéma obvodu s rozloženými parametry [1]



Obr. 10 Schéma náhradního obvodu s soustředěnými parametry [1]

Prvním krokem je stanovení admitancí s rozloženými parametry z rovnice (26)

$$Y = \frac{(\omega\sqrt{LC})\cot g(\omega\sqrt{LC})}{j\omega L} \quad (26) [1]$$

Pro obvod z obr. 10 platí vztah pro výpočet admitancí

$$Y^* = \frac{1-\omega^2 L^* C^*}{j\omega L^*} \quad (27) [1]$$

Jak je patrné z názvu metoda rovnost admitancí, je založena na principu rovností admitancí pro původní a náhradní obvod. Proto položíme obě rovnice, že se rovnají. Platí pro výpočet rovnice (28)

$$Y = Y^* \\ \frac{(\omega\sqrt{LC})\cot g(\omega\sqrt{LC})}{j\omega L} = \frac{1-\omega^2 L^* C^*}{j\omega L^*} \quad (28) [1]$$

Pro řešení rovnice si musíme zvolit jednu hodnotu, například náhradní kapacitu nebo indukčnost.

Pro snadnější výpočet je lépe si zvolit hodnotu indukčnosti, stejnou indukčnost zvolíme i pro náhradní obvod.

Z rovnice (28) musíme vytknout hodnotu náhradní kapacity obvodu.

$$C^* = \frac{1-(\omega\sqrt{LC})\cot g(\omega\sqrt{LC})}{\omega^2 LC} C \quad (29) [1]$$

Výpočet rovnosti admitancí je velmi efektivní metodou, a patří mezi velice oblíbené metody pro výpočet parametrů náhradního obvodu.

3.3.2 Popis metody výpočtu rovnosti vlastních kmitočtů

Vlastní kmitočet obvodu zjistíme z schéma obvodu s rozloženými parametry (obr. 9).

Pro výpočet použijeme rovnici (26)

Rovnice admitance (26) položíme rovnu nule.

„To znamená totiž, že přiložíme-li na svorky A a B napětí s kmitočtem zjištěným podle této úvahy, dojde k rezonanci a pak se Y skutečně rovná nule. Má-li se pravá rovnice (26) rovnat nule, musí se její činitel rovnat nule; protože se však

$$(\omega\sqrt{LC}) = 0 \quad (30) [1]$$

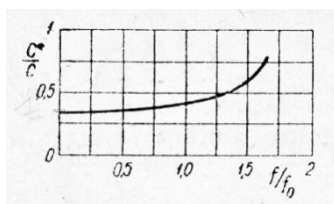
To je splněno pro $\frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi, \dots$ a schéma nemá jen jeden, ale nekonečně mnoho vlastních kmitočtů.“ [1]

Pro zjištění vlastního kmitočtu stačí vypočítat první vlastní kmitočet obvodu pro rovnici (26).

„První vlastní kmitočet je“ [1]

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (31) [1]$$

Další možnost výpočtu je nahradit kapacitu pomocí odečítání hodnot z obr. 11



Obr. 11 Závislost náhradní kapacity na poměru vnuceného a vlastního kmitočtu [1]

Náhradní kapacita se mění se změnou poměru frekvence obvodu. Při zanedbání rozdílu změny rozdílu poměru kapacit můžeme použít vzorec pro výpočet náhradní kapacity (32)

Výpočet náhradní kapacity

$$C^* = \frac{C}{3} \quad (32) [1]$$

Tento vztah platí pro nízké kmitočty, pokud bychom chtěly získat přesnější údaje musíme provést přesnější výpočet. Opakováním výpočtu s pomocí odečtení hodnoty v grafu (obr. 11).

Výslednou hodnotu vlastní frekvence vypočítáme dosazením do rovnice (33).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC^*}} \quad (33) [1]$$

Pokud si zvolíme metodu rovnosti vlastních kmitočtů získáme hodnoty méně přesné než v případě metody rovnosti admitancí. Ale značnou výhodou je jednoduchost při řešení složitějších obvodů.

3.3.3 Popis výpočtu metody rovností energetických obsahů

Tento způsob výpočtu je nejnázornější, že všech tří možnosti určování náhradní kapacity. Může sloužit jako kontrolní výpočet k ověření vypočítaných hodnot. Metoda vychází ze skutečnosti jako v případě rovnosti admitancí.

„Vychází z poznatku, že admitance obvodu připojeného na dvě svorky, je při určitém kmitočtu stejná jako admitance jednoduchého obvodu podle obr. 10. Je tomu tak tehdy, je-li množství elektrostatické energie nahromaděné v obou obvodech v maximu napětí stejné a je-li stejné i množství elektromagnetické energie v maximu proudu“ [1]

Pro náš výpočet budeme zanedbávat nelinearitu indukčnosti a bude brána, že je lineární.

Energetický obsah v maximu proudu vypočítáme pomocí vzorce (34)

$$A = \frac{1}{2} \int_0^C u^2 dc \quad (34) [1]$$

Náhradní energetický obsah vypočítáme pomocí obdobné rovnice (35)

$$A = \frac{1}{2} C^* U^2 \quad (35) [1]$$

Z rovnice (35) vytkneme náhradní kapacitu C^* a dosadíme zjištěnou hodnotu energetického obsahu obvodu s rozloženými parametry. Napětí zvolíme stejné jako u obvodu s rozloženými parametry.

Všechny metody rovností lze výhodně stanovit měřením na reálném objektu. A výpočtem zjistíme jen náhradní kapacitu v náhradním obvodu.

4. Fyzikální model

Fyzikální model by měl splňovat danou funkci, pro kterou je vyroben nebo zakoupen. Pro případ výroby jsme omezeni jen materiály, které jsou na trhu k dostání. V případě zakoupení jsme spíše podřízeni trendům trhu ve světě. Ve většině speciálních případů musíme investovat do velmi nákladné a zdlouhavé výroby.

Výroba je problematická a časově náročná a proto se většinou pokoušíme zakoupit dané systémy a zařízení od některých výrobců. Pokud fyzikální model nelze zakoupit, je jen jediná možnost, vyrobit je.

V této práci jsem se zabýval výrobou fyzikálního modelu pro simulaci přechodných dějů při vypínání. V zadání bylo zadáno realizovat fyzikální model, s kterým lze danou problematiku měřit. Proto jsem musel realizovat indukční a kapacitní dekády. Důvodem byla nemožnost získání vhodných indukčních dekád pro laboratorní měření na našem trhu.

Mezi podmínky které musí fyzikální model splňovat jsou tyto:

Indukční dekáda

- I. Indukční dekáda musí dosáhnout indukčnosti několika Henry.
- II. Dekáda musí mít co nejmenší rezistivitu cívky, aby nedocházelo k útlumu přechodného děje.
- III. Jednotlivé indukčnosti musí být realizovány samostatně, aby nedocházelo k rušivým vlivům.
- IV. Dekáda musí být realizována v zdířkovém provedení.

Kapacitní dekáda

- I. Musí být splněn rozsah vhodný pro nastavení vhodných frekvencí fyzikálního modelu.
- II. Musí být splněna životnost a přesnost kapacitní dekády.
- III. Dekáda musí být realizována v zdířkovém provedení

4.1 Materiály pro výrobu dekád

Materiálů pro výrobu dekád je velké množství. Jediným rozdílem pro většinu konstruktérů je vhodný poměr ceny a kvality (přesnosti). Na trhu se vyskytuje velice rozmanitý sortiment. Ale hlavní problém je vhodně zvolit dle požadavků nejvhodnějšího výrobce a prodejce.

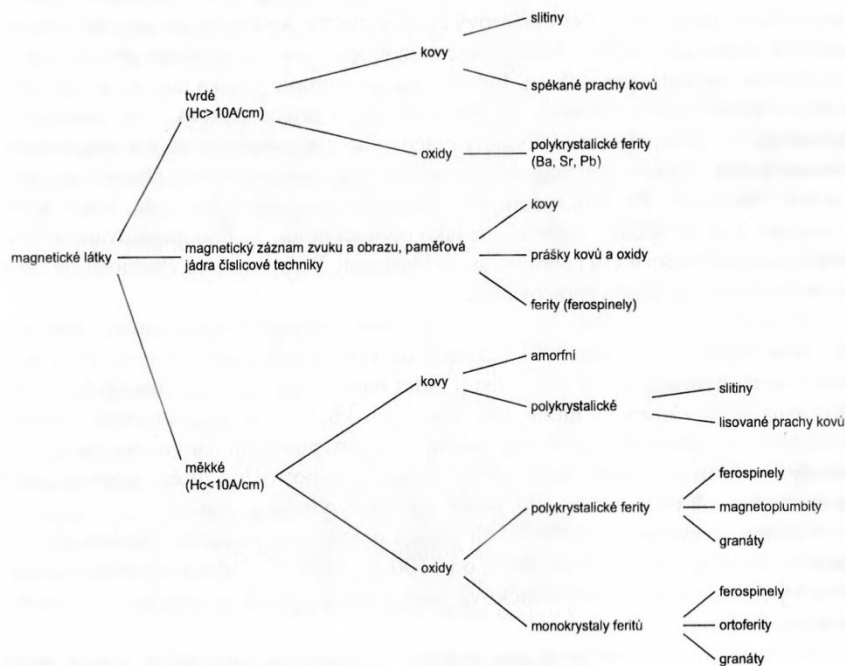
4.1.1 Materiál pro indukční dekádu

Hlavním omezením pro moji indukční dekádu byly velice specifické parametry, které jsem musel dodržet. Zbývající parametry jsem si mohl zvolit, za předpokladu že budou splněny předchozí specifikace.

Od těchto základních parametrů jsem se snažil vycházet a nalézt vhodný materiál. Zvolil jsem si postup hledání. Postup jsem zvolil podle literatury [3], kde jsem si zvolil záchytné body, které by měly být splněny. Tento postup mě přivedl k feritovým materiálům, ze kterých jsem si zvolil ten podle mých názorů nejlepší.

Feritové materiály

„Ferity jsou magnetické, keramické, polykrystalické látky. Průmyslově jsou vyráběny i monokrystalové a monokrystalické tenké vrstvy. Jsou charakterizovány o více než osm řádů vyšším měrným odporem než mají kovové magnetické látky. Technologickým základem jejich výroby jsou kysličníky kovů a vzácných zemin. Ferity používané pro cívky a transformátory náleží k ferospinelům. Umístění feritů mezi magnetickými látkami, které jsou rozříděny podle účelu použití na magneticky tvrdé a magneticky měkké je uvedeno na obr. 12“ [3]



Obr. 12 Umístění feritů v systémovém rozřídění magnetických látek [3]

Feritová jádra

Poté, co jsem zvolil feritový materiál jako základ budoucí dekády, jsem musel vyřešit jaký použiji materiál a tvar jádra. S výběrem mi pomohl obr. 13. Z této tabulky jsem zvolil materiál s vysokou permeabilitou který se pro tento účel nejvíce hodil. Zvolený materiál byl 3E5. Po zhodnocení jsem zvolil jádro tvaru RM. Tento typ jádra má výhodu možnosti strojního navíjení a půlené jádro umožňuje využít mezeru mezi jádry k nastavení přesné hodnoty indukčnosti.

systém	permeabilita	hlavní aplikace	přibližný kmitočtový rozsah v aplikaci, tvary jader	tuzemský výrobce	fa Siemens	fa Philips
Mn-Zn	3 000 až 10 000	širokopásmové transformátory, impulzní transformátory, odrušovací prvky	do 5 MHz, spektrum kmitočtů do 200 MHz RM, P, X, EP, toroid		N30(4310) T37(6500) T35(6000) T42(12000) T38(10000) N55(5300)	3E1(3800) 3E25(6000) 3S1(4000) 3E5 (10000) 3C11(4300) 3E4(4700)
	1 000 až 3 000	vysoká indukce nasycení, spínací zdroje, vychylovací cívky TV, laděné cívky, odrušovací prvky, magn. hlavy	1 kHz až 100 kHz RM, P, E, EF, ETD, EFD, EC U, I, EP, CC, Q, X, toroid, rolničková jádra, ladicí jádra	H21(1900)	N27(2000) N22(2000) N41(3000) N26(2300) N47(1400) N61(3000) N4(200)	3C10(1800) 3B8(2300) 3F3(1800) 3C80(2000) 3C85(2000)
	800 až 2 500	laděné cívky, odrušovací prvky, čidla polohy	0,1 MHz až 1,6 MHz E, U, I, P	H10(1300) H20(2000) H11(1000) H22(2200) H12(1200) H23(2300) H18(1800)	N48(2000) N87(2300) N49(1400) N62(1900) N67(2300)	3H3(2000) 3H1(2300)
	500 až 1 000	laděné cívky, antenní tyče, čidla polohy	0,1 MHz až 10 MHz P, RM, toroid	H6(600) H7(650)	M33(750) N59(850)	3D3(750) 3C2(900) 3B1(900)
	500 až 2 000	širokopásmové transformátory, spínací zdroje, antenní tyče, odrušovací prvky	méně než 5 MHz RM, P, elevátor, EC		K10(600)	4A11(700) 4S2 (700)
Ni-Zn	150 až 500	antenní tyče, spínací zdroje, vychylovací cívky pro TV, laděné cívky	do 10 MHz RM, toroid, elevátory	N2(200) H3R(350)	M11(250)	2A2(350) } vych. cívky 2B1(350) } systém Mg-Zn 4B1(250) 6B1(250)
	70 až 150	antenní tyče pro krátké vlny, vř. výkonové transformátory, symetizační prvky, odrušovací prvky, laděné cívky	do 30 MHz RM, P, rolničkové jádro	N1(120)	K1(80)	4C65(125) 4C6 (100)
	30 až 70	laděné cívky, antenní tyče, odrušovací prvky, symetizační prvky	do 40 MHz	N05(50)		4D2(60)
	10 až 30	laděné cívky, symetizační prvky, antenní tyče	do 400 MHz P	N01(8) N02(20)	U60(8)	4E1(15)
	800	přesytky, magnetické repulátory				3F1(800) 3R1(800)
permin- vary	méně než 20	laděné cívky, šroubovací jádra, symetizační prvky	do 500 MHz P, šroubová jádra	N01P(11) N08P(80)	U17(10) K12(24)	

Obr. 13 Technické aplikace v přibližném rozsahu permeability jádra a kmitočtu. Obchodní značky feritů tuzemského výrobce a dvou zahraničních [3]

4.1.2 Materiál pro kapacitní dekádu

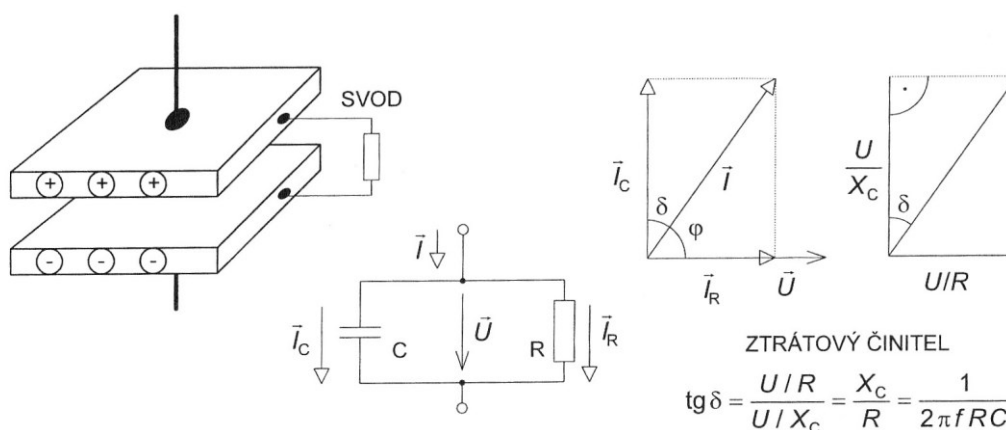
Na trhu je dostatečné množství provedení a typů kondenzátorů. Bez problémů lze splnit požadavky na hodnotu kapacit i z hlediska napětí. Proto jsem musel přistoupit na vyřazovací metodu, kterou jsem eliminoval jednotlivé typy kondenzátorů.

Kondenzátory

„Nejdůležitější vlastností kondenzátoru je kapacita a dalším důležitým parametrem je jmenovité napětí kondenzátoru. Vlastnosti kondenzátoru ovlivňuje izolační odpor dielektrika. Pro většinu případů lze vystačit s jednoduchým náhradním schématem, u kterého se modeluje nedokonalost izolantu paralelním připojením vodivosti k ideálnímu kondenzátoru“ [4]

„Jako měřítko kvality kondenzátoru při určitém kmitočtu se uvádí ztrátový činitel. Ztrátový činitel $\tan \delta$ je tangens doplňkového úhlu k fázovému posuvu φ “ [4]

Na obr.14 je zobrazeno náhradní schéma reálného kondenzátoru a ztrátový činitel.



Obr.14 Náhradní schéma kondenzátoru [4]

Druhy kondenzátorů

„Kondenzátory se nejčastěji rozdělují podle druhů izolantu. Permittivita materiálu dielektrika a její teplotní a kmitočtová závislost v rozhodující míře určuje vlastnosti kondenzátorů. Nejpoužívanější jsou keramické a plastové kondenzátory. Keramika se vyrábí v rozmezí pikofaradů až nanofaradů a plastové kondenzátory dosahují až jednotek mikrofaraďů. Vlastnosti těchto kondenzátorů závisí na použitém dielektriku. Oba typy bývají kvalitní a používají se proto velmi často.“ [4]

Elektrolytické kondenzátory

Hlavní nevýhoda těchto kondenzátorů je nutnost formátování při dlouhodobém nepoužívání. Důvodem je vypařování elektrolytu z kondenzátor a případně poškození elektrod.

Tantalové kondenzátory

Obdobný problém s časovou stálostí parametru.

Plastové kondenzátory

Vhodné parametry i stálost je vyšší. Nezvoleny jen z důvodu lepších parametrů u keramických kondenzátorů.

Keramické kondenzátory

Zvoleny byly keramické kondenzátory a důvodem byla vysoká časová stálost s minimální změnou parametrů. Vhodná velikost pro sérioparalelní a paralelní spojení z důvodu přesného nastavení hodnoty. Použití přesných keramických kondenzátorů je velice nákladné a přesnost udávaná

výrobce je někdy velice rozdílná. Proto jsem zvolil cestu sestavením hodnot pomocí kombinace keramických kondenzátorů.

4.2 Průmyslově vyráběné dekády

V této části zhodnotím parametry indukčních a kapacitních dekád, které jsou běžně k dostání na našem trhu. Porovnány budou jen parametry, které by měla dekáda splňovat pro fyzikální model simulace při vypínání.

4.2.1 Indukční dekáda

První indukční dekádu, kterou chci porovnat je „INDUKČNÍ DEKÁDA L-BOX 01“ [5]. Tato indukční dekáda je běžně využívána na VŠB k laboratorním měřením.

”
Název: INDUKČNÍ DEKÁDA L-BOX 01
Rozsah indukčnosti: 10 uH - 111,1 mH
Rezistivita: neuvedeno
Maximální proud: neuvedeno
Napětí: 35 V
Přesnost: 5 %
“ [5]

Zhodnocení: Tato indukční dekáda má malý rozsah hodnot indukčnosti pro simulaci přechodného děje při vypínání.

”
Název: Indukční dekáda L3-250 SAB
Rozsah indukčnosti: 1μH - 11,111H
Rezistivita: neuvedeno
Maximální proud: 8-1000mA
Napětí: DC-60 V;AC-25 V(efektivní hodnota)
Přesnost: < 2,5 %
“ [6]

Zhodnocení: Po zhodnocení základních údajů nelze vyvrátit ani potvrdit že indukční dekáda je použitelná pro měření. Výrobce totiž neuvádí rezistivitu dané dekády. Pokud by rezistivita obvodu byla příliš velká, ovlivnila by příliš měření a děj by mohl být utlumen příliš.

”
Název: METR-MA2705
Rozsah indukčnosti: 0 - 999mH
Rezistivita: neuvedeno
Maximální proud: neuvedeno
Napětí: neuvedeno
Přesnost: ±5%
“ [7]

Zhodnocení: S informacemi uvedenými nelze stanovit použitelnost. Rozsah indukčnosti je velice malý.

Po prostudování informací musím přiznat, že informace prodejců jsou velmi nedostatečné pro zákazníka. Kdybych měl porovnat informace třeba s informacemi, které výrobce udává v katalogových listech o elektrotechnických součástkách a materiálech, jsou informace nedostatečné.

4.2.2 Kapacitní dekáda

Vyráběné kapacitní dekády jsou z hlediska výroby mnohem jednodušší a v řadě případů splňují požadavky. Na trhu je velmi mnoho výrobců těchto dekád, které lze zakoupit.

” Název: KAPACITNÍ DEKÁDA C-BOX 01

Rozsah kapacity: 100 pF - 11,111 uF

Napětí: 35 V

Přesnost: 5%

“ [8]

Zhodnocení: Kapacitní dekáda je použitelná k simulaci.

” Název: Kapacitní dekáda C1-250 SAB

Rozsah kapacity: 100 pF - 11,111 uF

Napětí: AC-100V; DC-100V

Přesnost: < 1%

“ [9]

Zhodnocení: Kapacitní dekáda je použitelná k simulaci.

” Název: BC05 - Kapacitní dekáda

Rozsah kapacity: 0,1 nF-11,111 μF

Napětí: AC-230 V; DC-300V

Přesnost: 2 %

“ [10]

Zhodnocení: Kapacitní dekáda je použitelná k simulaci.

Výrobci kapacitních dekád mají stejné rozsahy kapacit. Z hlediska napětí převyšují kapacitní dekády potřebné napětí vždy.

Na trhu je k dostání i kombinovaná verze s rezistivní, kapacitní i induktivní dekádou.

4.3 Návrh a realizace dekády

Pro realizaci fyzikálního modelu pro měření v laboratoři jsem měl zadány požadavky. Prvním požadavkem bylo nepoužívat klasické přepínače pro nastavení hodnoty u dekády. Mezi další požadavky byla realizace indukčnosti na samostatných jádrech a dosáhnout hodnoty indukčnosti několika Henry při malé rezistivitě indukčnosti. Všechny podmínky jsem při návrhu a realizaci splnil.

Dále jsem si dal za úkol realizovat celé dekády, aby byly lehce a jednoduše vyrobitelné bez nutnosti složitějšího vybavení. Ale také jsem se zaměřil na lehkou opravitelnost, pro případ poškození při měření.

4.3.1 Indukční dekáda

Indukční dekáda byla realizována v provedení třístupňovém rozsahu a v počtu tří kusů.

Použitý materiál:

1 x Krabička Z 37 KP28 [11]

24 x Zdířka na banánek, do panelu, barva černá [12]

12 x FERROXCUBE - RM6S/I-3E5 - FERRITE CORE, RM/I, 3E5 [13]

12 x FERROXCUBE - CSV-RM6S-1S-6P-G - BOBBIN, RM6S, 1 SECTION, 6PIN [14]

12 x Plošný spoj 30x10 mm(s vyvrtanými otvory 3,2 mm)

24 x Šroub M3 x 20mm

24 x Matice M3

1 x Laminovací fólie A4
 1 x A4 vytištěný list
 Smaltovaný drát průměr 0,06 mm a 0,5 mm
 Leptuvzdorný lak
 Oboustraná lepicí páska
 Vteřinové lepidlo
 Bezolovnatá pájka S-Sn90Ag10

Popis výroby:

Prvním úkolem bylo stanovit rozložení dle efektivního i symetrického hlediska. Poté jsem vyvrtal otvory pro zdířky panelové v počtu 24 otvorů o průměru 8,6 mm. Pro šrouby jsem vyvrtal 24 otvorů o průměru 2,4 mm. Do otvoru jsem poté vyřezal závit M3. Ze všech otvorů jsem odstranil přebytečný materiál.

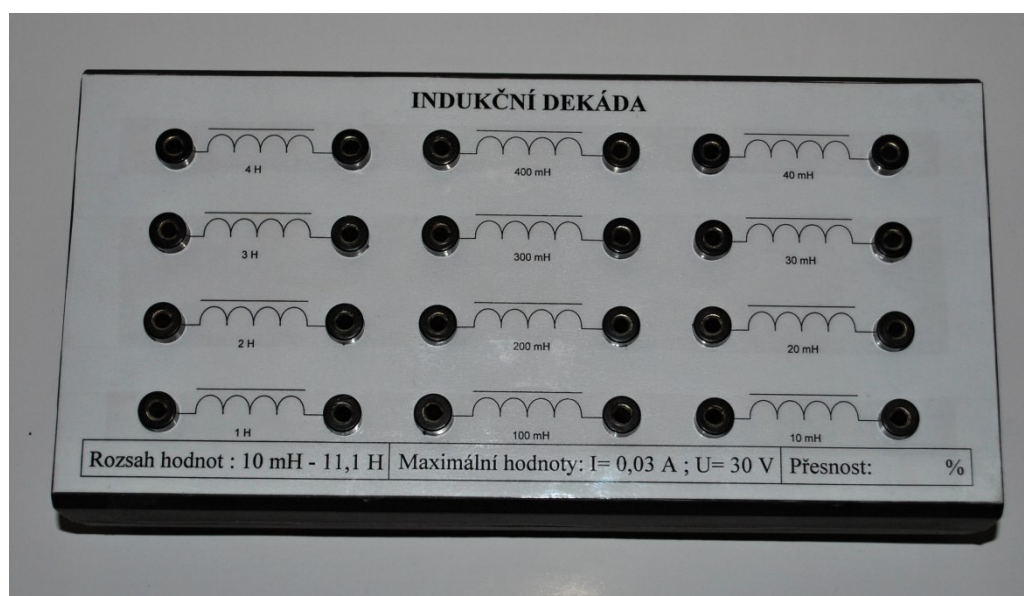
Další úpravou bylo převrtání otvorů na spodním uchycení, které jsem převrtal průměrem 4,8 mm.

Na přední panel jsem vytvořil popis a zalaminoval laminovací fólii. V zalaminovaném předním popisu jsem vytvořil otvory pro panelové zdířky. S využitím oboustranné lepicí pásky jsem přilepil popis na přední část krytu. Další fází bylo připevnění panelových zdířek a přišroubování k přednímu krytu.

Poslední fází bylo navinutí smaltovaného drátu o průměru 0,06mm na kostřičku s vhodným počtem závitů, tak aby byla hodnota asi o 10 % větší než žádaná. S použitím elektroizolační pásky jsem připevnil dvě poloviny jádra k sobě. Jádro jsem připevnil mezi přední část krytu a plošným spojem přidržel jádro. Plošný spoj jsem dotahoval pomocí dvou matic, abych vytvořil vhodný moment přitlaku matic, při kterém hodnota indukčnosti odpovídala potřebné hodnotě.

Využil jsem faktu, že mezerou mezi jádry lze nastavit indukčnost libovolně dle přitlaku matic.

Výsledná dekáda je na obrázku obr. 15



Obr. 15 Indukční dekáda

Zhodnocení:

Hlavním problémem bylo nalézt dost kvalitní feromagnetický materiál a o vhodném tvaru z důvodu navíjení vinutí. Při svém hledání jsem zkoušel několik druhů provedení feromagnetických materiálů. Po zhodnocení výhod jsem se rozhodl z důvodu nastavení indukčnosti na požadovanou hodnotu a rychlosti výroby, pro jádra typu RM s dělením jádrem na dvě části. Tomuto požadavku vyhovoval zvolený materiál nejvíce.

Nastavení hodnoty jsem se inspiroval změnou magnetického toku u starých svařovacích transformátorů. Princip je velmi jednoduchý a rychle realizovatelný.

Další výhodou tohoto provedení je možnost s touto dekadou měřit i více frekvenčních obvodů s využitím jedné indukční dekády. Díky samostatným indukčnostem je možné využít všechny cívky s jádrem k měření současně. Na rozdíl od vyráběných indukčních dekád kde jsou jen dvě svorky pro připojení.

4.3.2 Kapacitní dekáda

Kapacitní dekáda je realizována v provedení pětistupňovém rozsahu a v počtu tří kusů.

Použitý materiál:

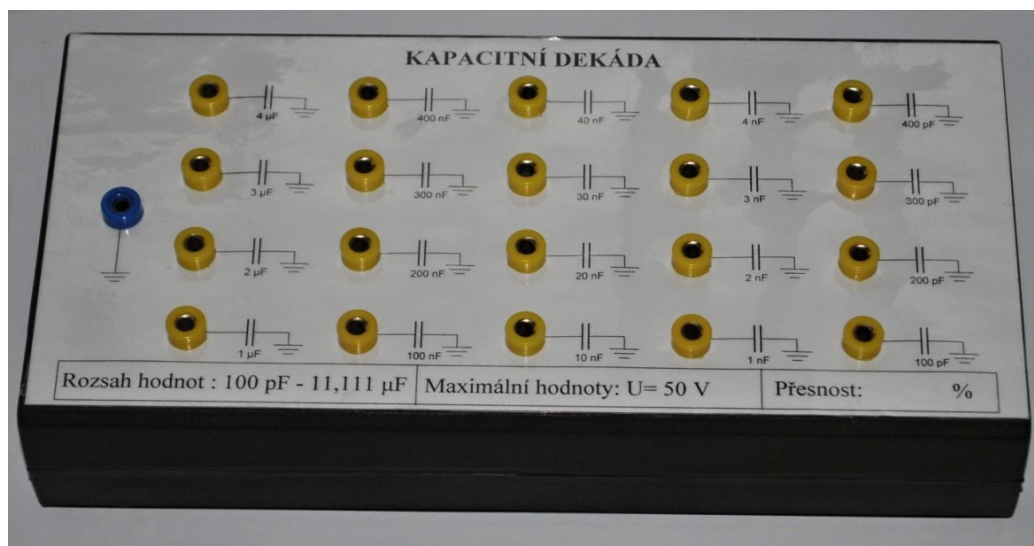
- 1 x Krabička Z 37 KP28 [11]
- 20 x Zdířka na banánek, do panelu, barva žlutá [15]
- 1 x Zdířka na banánek, do panelu, barva modrá
- 2 x Plošný spoj 200x10,3 mm(s vyvrtanými otvory 3,2 mm)
- 4 x Plošný spoj 120x10,3 mm
- 6 x Šroub M3 x 20mm
- 6 x Matice M3
- 1 x Laminovací fólie A4
- 1 x A4 vytištěný list
- 1x Měděný kabel s modrou izolací 45 mm
- Keramické kondenzátory 100 pF, 1 nF, 10 nF, 100 nF, 1 μ F
- Vteřinové lepidlo
- Bezolovnatá pájka S-Sn90Ag10

Popis výroby:

Postup výroby je v první části totožný s indukční dekadou. Nejdříve jsem vytvořil rozložení dle efektivního i symetrického hlediska panelových zdířek. Otvory do přední části jsem vyvrtal vrtákem o průměru 8,6 mm. Poté jsem vytvořil popis předního panelu a zalaminoval laminovací fólii. V zalaminovaném popisu jsem vytvořil otvory pro panelové zdířky a přilepil vteřinovým lepidlem na přední kryt.

Úchyty zemnicích pásků jsou tvořeny plošnými spoji které jsou přišroubovány šrouby M3 a maticemi M3 k přednímu krytu. Vzájemné spojení je tvořeno měkkou pájkou bezolovnatou. Dekáda je konstruovaná se společnou zemí.

Hodnota kapacity je tvořena vhodně vybranými keramickými kondenzátory, které jsou spojeny paralelně i sérioparalelně. A jejich kombinací jsem nastavil co nejpřesnější hodnotu kapacitní dekády. Výsledná dekáda je na obrázku obr. 16 .



Obr. 16 Kapacitní dekáda

Zhodnocení:

Keramické kondenzátory jsem zvolil z důvodu nízkého ztrátového činitele a dále také z důvodu vysoké časové stálosti. Kapacitní dekáda bude s pravděpodobností využívána jen v letním semestru, pro výuku. A kdybychom použili například elektrolytické kondenzátory, byla by nutnost před výukou provádět formátování kondenzátorů před použitím. Takto je možné libovolně využívat kapacitní dekády celé dlouhé roky, bez nutnosti údržby.

Prvním problémem byl fakt, že přesnost kondenzátoru jak udává výrobce není vždy tak jednoznačná, jak by měly být. Kapacita kondenzátorů se i u velmi přesných kondenzátorů příliš neblíží přesnost. Nejdříve jsem zakoupil drahé kondenzátory s vysokou přesností i cenou, ale zjistil jsem, že není možné získat uspokojivé výsledky touto cestou. Proto jsem si objednal kondenzátory nízké ceny i přesnosti a hodnotu jsem sám složil jejich kombinací.

Společnou zem jsem zvolil z důvodu úspory místa na předním panelu ale i pro jednodušší zapojení. Při zapojení lze používat jednu kapacitní dekádu pro více frekvenční obvody.

4.3.3 Příslušenství pro měření

Jako jediné příslušenství k měření jsem měl vyrobit spínací prvek pro měření simulace při vypínání.

Dále měl obsahovat místo pro připojení vypínacího rezistoru pro lepší simulaci aperiodického průběhu.

Použitý materiál:

1 x U-KP03 [16]

1 x Tlačítkový spínač do panelu

2 x Zdířka banánek panel žlutá [15]

2 x Zdířka banánek panel černá [12]

1 x KY 711 – s chladičem

1 x Laminovací fólie A4

1 x A4 vytištěný list

Smaltovaný drát

Vteřinové lepidlo

Popis výroby:

Nejdříve jsem rozložil dle efektivního i symetrického hlediska panelové zdířky a tlačítka. Panelové zdířky jsou vyvrtány vrtákem o průměru 8,6 mm a otvor pro tlačítko je zhotoven průměrem 7,2 mm. Na přední panel jsem přilepil za zalaminovaný popis vteřinovým lepidlem. Po přidání

panelových zdírek a tlačítka jsem připájel smaltovaný drát a usměrňovací diodu. Výsledné příslušenství je na obrázku obr. 17



Obr. 17 Spínací prvek

Zhodnocení:

Spínací prvek je použitelný pro měření čistě jen simulaci spínacího prvku po připojení do žlutých panelových zdírek. Pokud budeme simulovat vypínání s tlumícím rezistorem připojíme rezistor do černých panelových zdírek. Ale můžeme použít černou zdíčku u vypínače a protilehlou žlutou panelovou zdíčku, a slouží jako spínání spínače. A poslední možnost je využití jako spínání reálným vypínačem. Spínací přípravek ale použít k mnoha způsobům měření, ale studenti využijí nejčastěji první zapojení případně druhé.

5. Měření

Měření jsem prováděl na osciloskopu „UNI-T UTD3152CE, 150 MHz, 1GS/s“ [17] digitální dvoukanálový osciloskop. Prováděné měření bylo prováděno pro jednofrekvenční a dvojfrekvenční obvod.

Nastavování dekády bylo prováděno přístroji UNI-T UT70A [18] a UNI-T UT603 [19]. Požité dva přístroje byly základem pro budoucí přesnost indukční a kapacitní dekády.

Použité měřicí přístroje:

-Osciloskop-UNI-T UTD3152CE, 150 MHz, 1GS/s (číslo: 2100003196) [17]

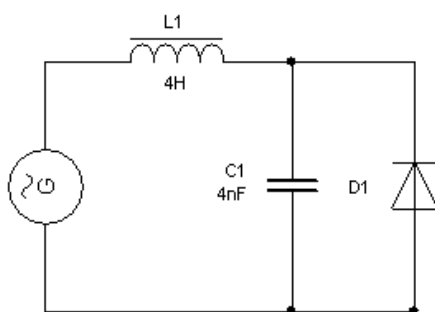
-Multimetr(RLC Metr) – UNI-T UT70A (číslo: 1120472602) [18]

-RLC Metr – UNI-T UT603 (číslo: 812007661) [19]

5.1 Jednofrekvenční obvod

Jednofrekvenční obvod z hlediska výpočtu je nejlepším příkladem pro vysvětlení více frekvenčních obvodů. Postup výpočtu je nejjednodušší, který je možný.

Schéma zapojení obvodu:



Obr. 18 Zapojení jednofrekvenčního obvodu

Výpočet:

Nastavené hodnoty na dekádách:

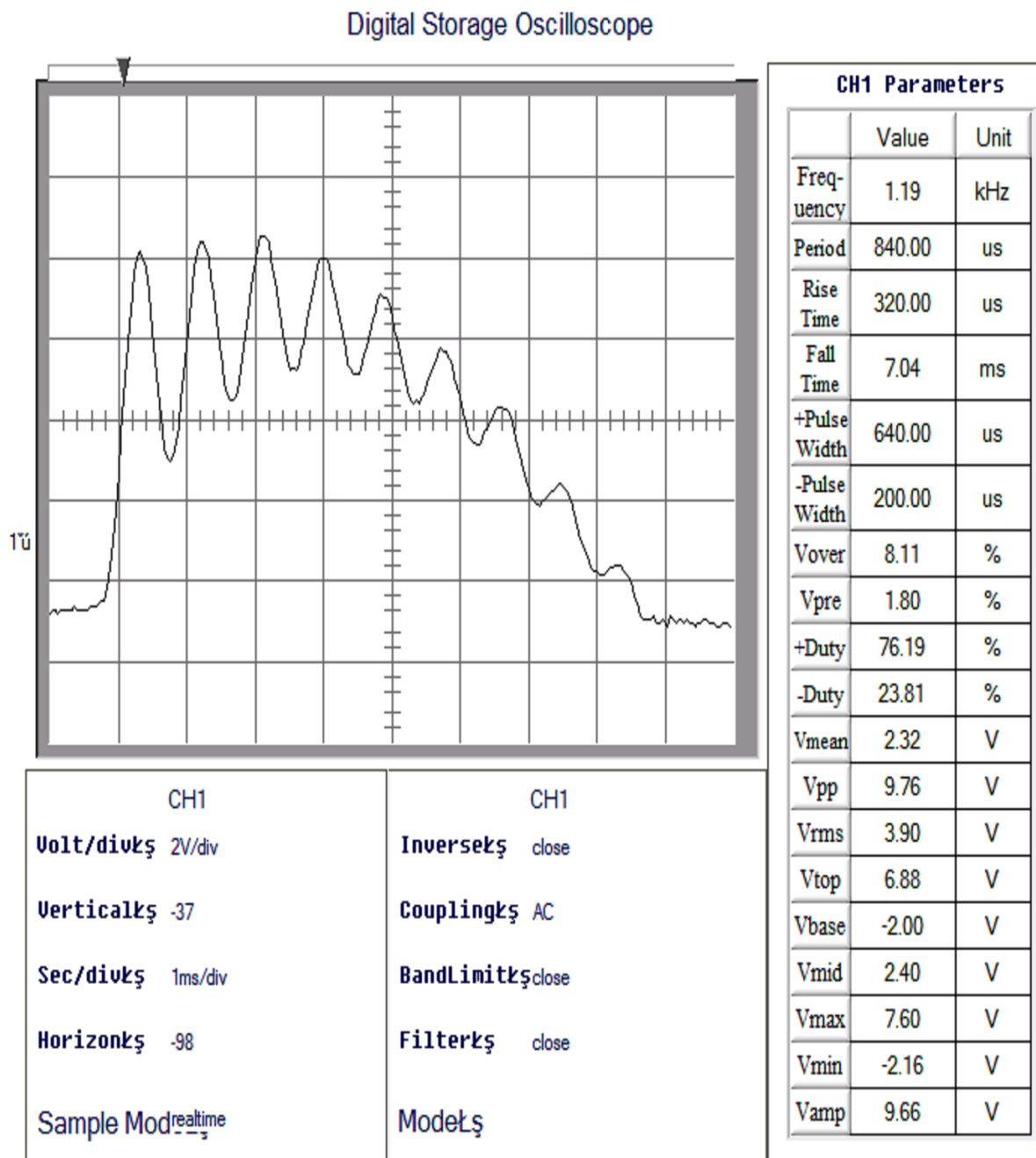
$L=4\text{ H}$

$C=4\text{ nF}$

Výpočet jednofrekvenčního obvodu pomocí vzorce (11)

$$f_{rid} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
$$f_{rid} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{4 \cdot 4 \cdot 10^{-9}}}$$
$$f_{rid} \approx 1258,23\text{ Hz}$$

Měření:



Obr. 19 Změřené hodnoty pro jednofrekvenční obvod

Zhodnocení:

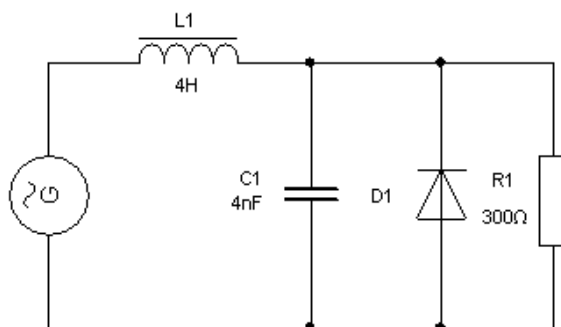
Při výpočtu můžeme použít i zjednodušený tvar výpočtu pomocí vzorce (11), rozdíl je tak malý, že při měření jej nezjistíme.

Hodnota změřená z osciloskopu je 1,19 kHz. Chybu je možno přisoudit měření a přesnosti dekady. Rozdíl v naměřené a vypočítané hodnotě je přibližně 5,4 %.

5.2 Jednofrekvenční obvod s tlumícím rezistorem

Jednofrekvenční obvod s tlumícím rezistorem je ideálním případem změny periodického průběhu na aperiodický průběh. Případně můžeme simulovat hledání na mezi periodického a aperiodického průběhu. K připojení tlumícího rezistoru stačí zmáčknutí jednoho tlačítka a je možné ihned porovnávat oba průběhy.

Schéma zapojení obvodu:



Obr. 20 Schéma jednofrekvenčního obvodu s tlumícím rezistorem

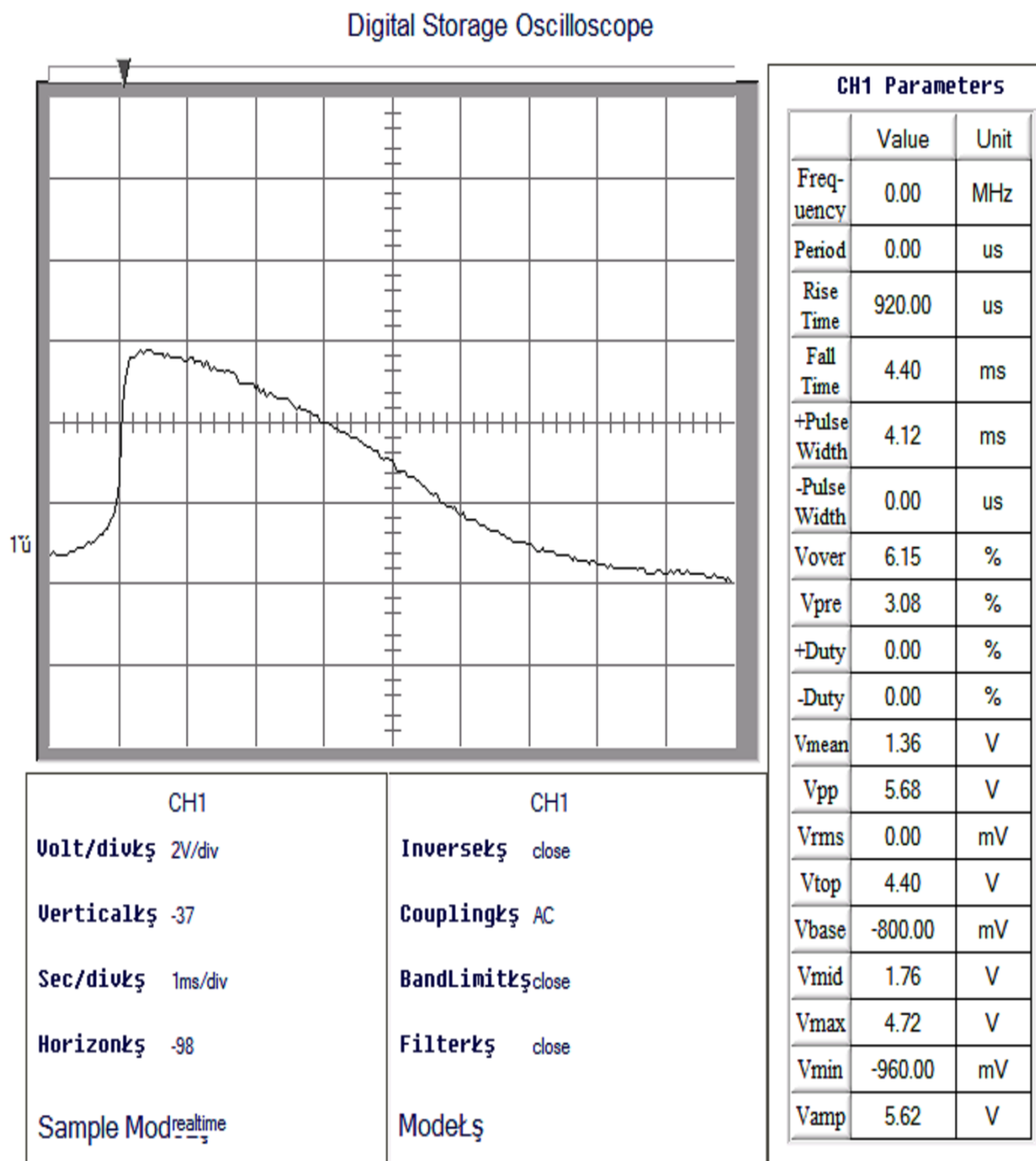
Nastavené hodnoty na dekadách:

$L=4\text{ H}$

$C=4\text{ nF}$

$R=300\text{ }\Omega$

Měření:



Obr. 21 Změřené hodnoty pro jednofrekvenční obvod s připojeným tlumícím rezistorem

Zhodnocení:

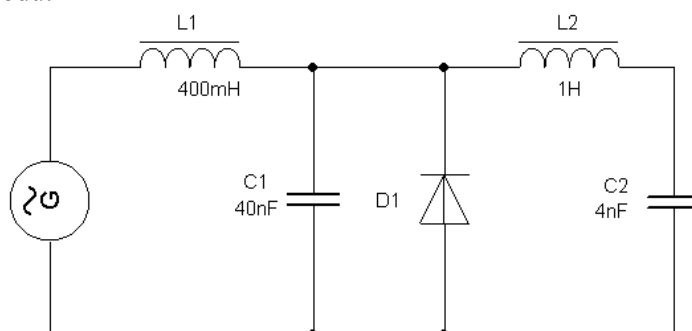
Po zhodnocení prvního měření jednofrekvenčního obvodu je možné porovnat s měřením s tlumícím rezistorem. Z výsledků vyplývá, že obvod s tímto tlumícím rezistorem je dokonale aperiodický průběh.

5.3 Dvojfrequenční obvod s zátěží

Dvojfrequenční obvody patří mezi složitější obvody. Jejich výpočet je více složitější a v dřívějších dobách byly vypracovány metody k jejich řešení. Ale přesnost těchto metod je velice časově náročná. Proto se v dnešní době přistupuje k simulacím v počítačových programech a případně simulacím na fyzikálním reálném modelu.

Dvojfrequenční obvody se vyznačují nepříliš vhodnou vlastností a to je potlačení různých frekvencí vzniklých kombinací hodnot. Proto je velice důležité volit vhodné kombinace indukčností a kapacit.

Hodnoty L_1 a C_1 reprezentují soustředné parametry generátorů, vedení a transformátorů. Hodnoty L_2 a C_2 reprezentují jen soustředné parametry zátěže. Přesnost této metoda je velice nepřesná při simulaci reálného modelu, od kterého očekáváme přesná data. Ale pro studijní účely je dostačující. Schéma zapojení obvodu:



Obr. 22 Schéma dvojfrequenčního obvodu s zátěží

Nastavené hodnoty na dekadách:

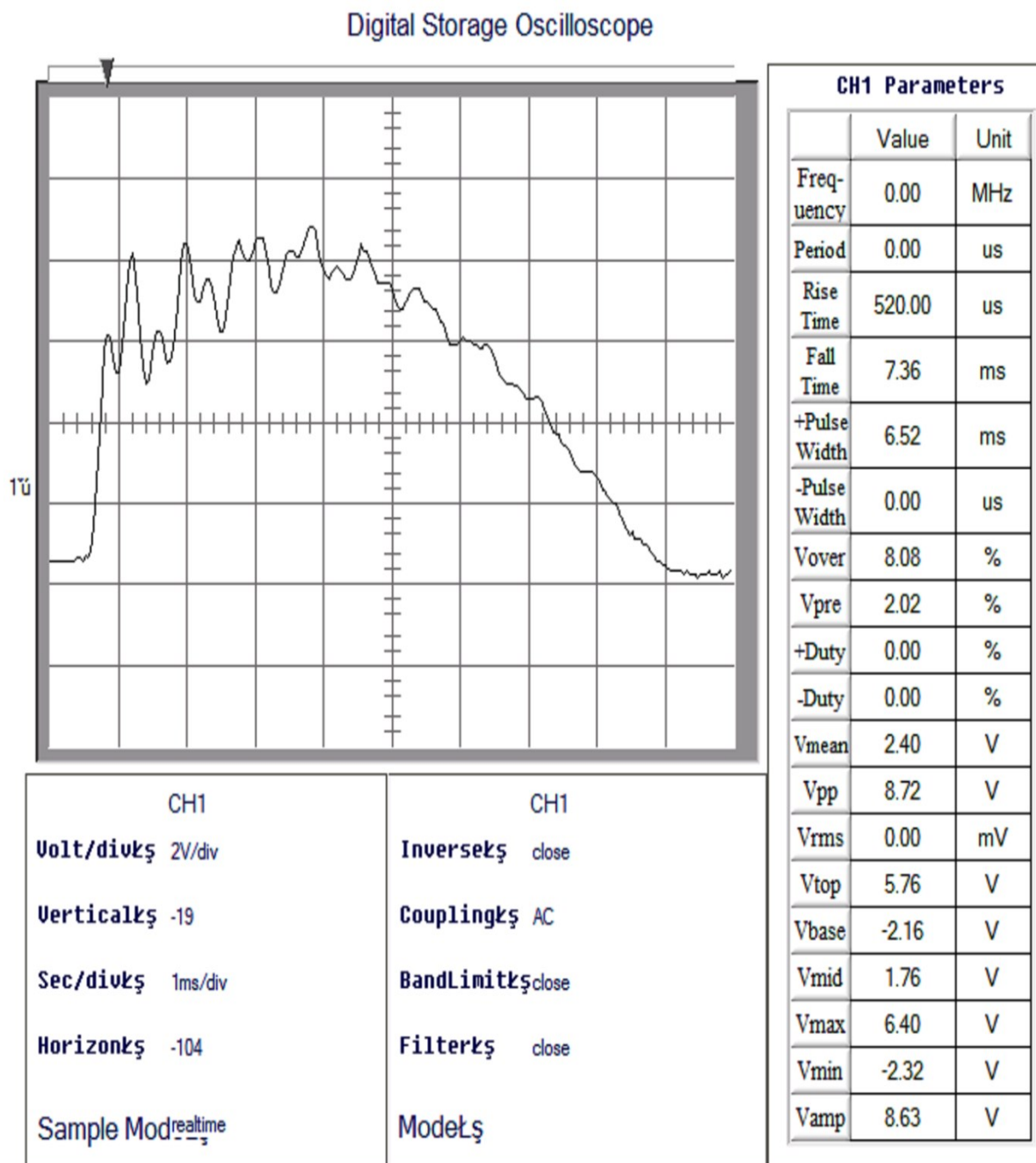
$L_1=400$ mH

$C_1=40$ nF

$L_2=1$ H

$C_2=4$ nF

Měření:



Obr. 23 Změřené hodnoty pro dvojfrekvenční obvod s zátěží

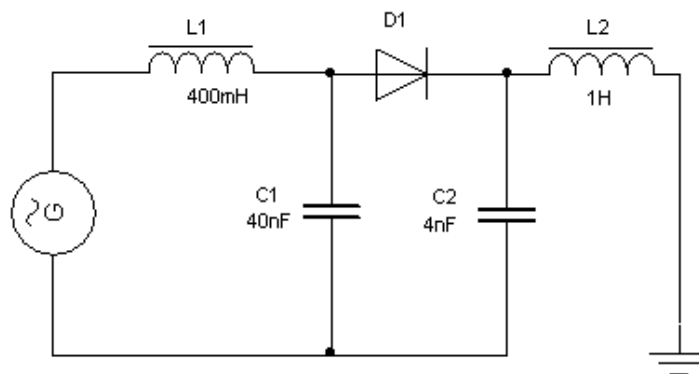
Zhodnocení:

Dvojfrekvenční obvod byl vykreslen dle očekávání. Vhodně zvolenou kombinací byl vykreslen průběh o dvou frekvencích. Nosná frekvence je přibližně 625 Hz a na ní je namodulována frekvence 1666,6 Hz.

5.4 Dvojfrequenční obvod s rozloženým napětí podél sítě

Tento dvojfrequenční obvod simuluje rovnoměrné rozložení napětí podél sítě. Hodnoty L_1 a C_1 reprezentují soustředné parametry generátorů, VVN a VN vedení a transformátorů. Hodnoty L_2 a C_2 reprezentuje vedení NN.

Schéma zapojení obvodu:



Obr. 24 Schéma dvojfrequenční obvod s rozloženým napětí podél sítě

Nastavené hodnoty na dekádách:

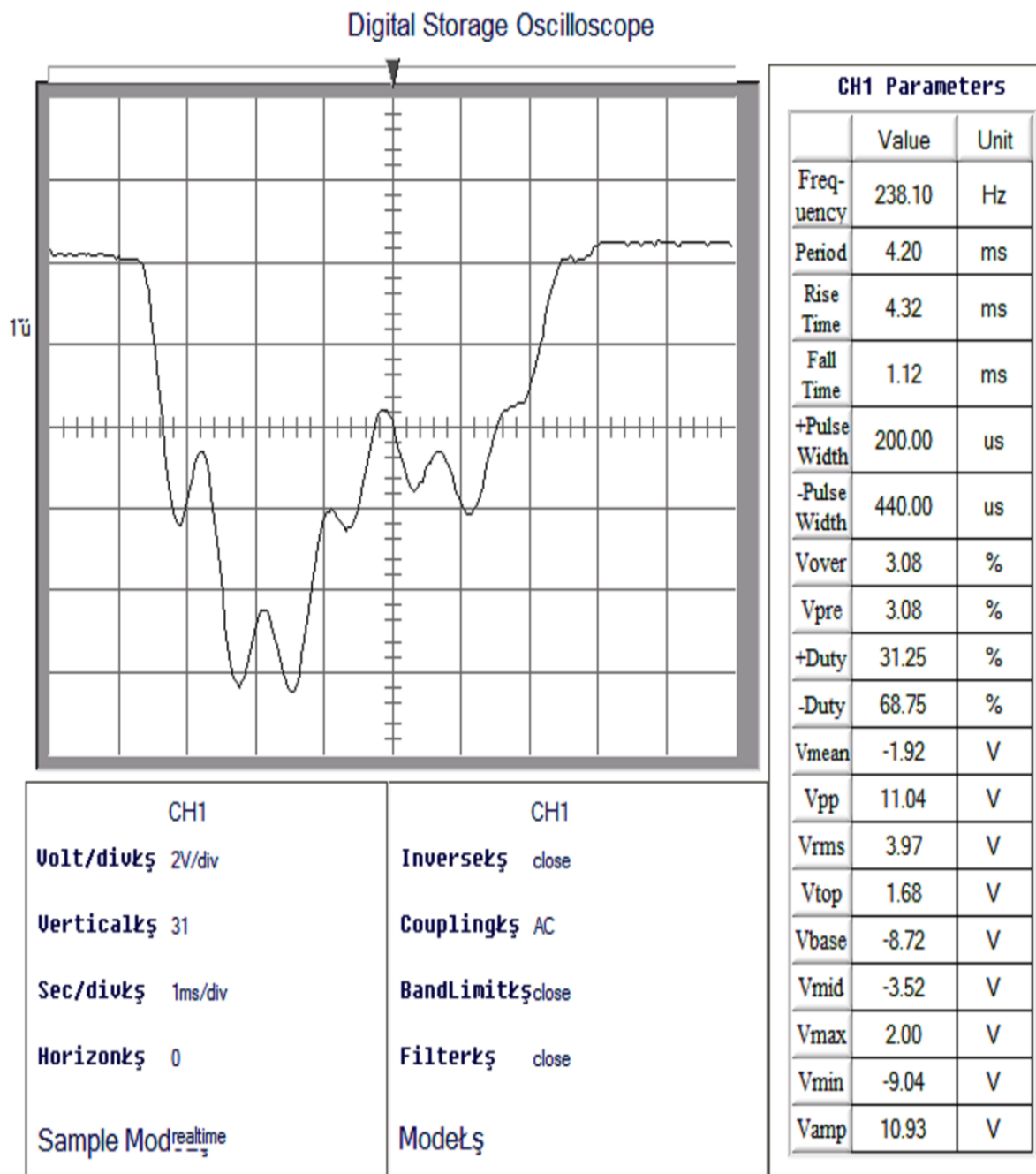
$L_1=400$ mH

$C_1=40$ nF

$L_2=1$ H

$C_2=4$ nF

Měření:



Obr. 25 Změřené hodnoty pro dvojfrekvenční obvod s rozloženým napětím podél sítě

Zhodnocení:

Dvojfrekvenční obvod s rozloženým napětím podél sítě. Hodnoty indukčností a kapacit se nezměnily, změněno bylo jen zapojení. Odečtené hodnoty nosné frekvence jsou přibližně 312,5 Hz a namodulovaná frekvence je přibližně 714,28 Hz.

6. Závěr

Výpočet teoretických hodnot byl proveden jen v prvním případě měření. Při zadaných hodnotách byla chyba přibližně 5,4 % pro vlastní kmitočty. Chybu lze přisoudit nepřesnému nastavení a chybě měřicích přístrojů. Výpočet dalších hodnot nebyl prováděn, z důvodu vyšší nepřesnosti metod, která při daných výpočtových metodách stoupá.

Po zhodnocení fyzikálního modelu, jsem našel jen problém se sníženou přesností. Tento problém lze provést korekcí nastavení dekád. Podmínky realizace ve všech případech byly dle očekávání a vyhovují k měření.

Další postup vývoje vidím v realizaci třífázového zdroje k napájení třífázové soustavy. Tím to způsobem by bylo možno simulovat reálné třífázové střídavé napětí při vypínání. Fyzikální model je pro tento účel zcela ideální. Lze s dekádami tento trojfrekvenční obvod realizovat i v třífázovém provedení. Při tomto měření na třífázové soustavě lze dosáhnout až na hodnotu šestifrekvenčního obvodu.

Proto vidím jako další postup ve výrobě nebo zakoupení trojfázového transformátoru. Jak je patrné z výrobního popisu dekády neobsahuje ochranu proti proudovému přetížení. Dále by bylo možno postupovat tímto směrem.

Seznam použité literatury

- [1] Zajíc, V. : Vypínače na vysoké napětí. 1.vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. 348 stran.
- [2] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje. 1.vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury 1985. 440 stran.
- [3] Faktro, Z.: Transformátory a cívky. 1.vydání. Praha: BEN – technická literatura 1999. 393 stran. ISBN 80-86056-49-X.
- [4] Láníček, R.: ELEKTRONIKA obvody • součástky • děje. 1.vydání. Praha: BEN – technická literatura 1998. 479 stran. ISBN 80-86056-25-2.
- [5] GES-ELECTRONICS, a.s [online]. 1991–2013, [cit.2013-2-3]. Dostupné z:
< <http://www.ges.cz/cz/indukcni-dekada-l-box-01-GES07313290.html> >.
- [6] Micronix [online]. 2009, [cit.2013-2-3]. Dostupné z:
< <http://eshop.micronix.cz/merici-technika/elektricke-veliciny/rlc-merice-a-dekady/rlc-dekady/l-3-250-sab.html> >
- [7] TME Czech Republic s.r.o [online]. 2009, [cit.2013-2-3]. Dostupné z:
< http://www.tme.eu/html/CZ/odporove-kapacitni-a-indukcni-dekady-metrel/ramka_6980_CZ_pelny.html >
- [8] GES-ELECTRONICS, a.s [online]. 1991–2013, [cit.2013-2-3]. Dostupné z:
< <http://www.ges.cz/cz/kapacitni-dekada-c-box-01-GES07313289.html> >
- [9] Micronix [online]. 2009, [cit.2013-2-3]. Dostupné z:
< <http://eshop.micronix.cz/merici-technika/elektricke-veliciny/rlc-merice-a-dekady/rlc-dekady/c1-250-sab.html> >
- [10] TME Czech Republic s.r.o [online]. 2009, [cit.2013-2-3]. Dostupné z:
< <http://www.ghvtrading.cz/merici-pristroje/laboratorni/rlcmetry/bc05.html> >
- [11] TIPA, spol. s r.o [online]. 1995-2010, [cit.2013-2-9]. Dostupné z:
< <http://www.tipa.eu/cz/krabicka-z-37-kp28/d-85624/> >
- [12] TIPA, spol. s r.o [online]. 1995-2010, [cit.2013-2-9]. Dostupné z:
< <http://www.tipa.eu/cz/zdirka-bananek-panel-cerna/d-87874/> >
- [13] Farnell [online], [cit.2013-2-9]. Dostupné z:
< <http://cz.farnell.com/ferroxcube/rm6s-i-3e5/ferrite-core-rm-i-3e5/dp/3056818> >
- [14] Farnell [online], [cit.2013-2-9]. Dostupné z:
< http://cz.farnell.com/ferroxcube/csv-rm6s-1s-6p-g/bobbin-rm6s-1-section-6pin/dp/3123443?in_merch=true&MER=i-9b10-00001460 >
- [15] TIPA, spol. s r.o [online]. 1995-2010, [cit.2013-2-9]. Dostupné z:
< <http://www.tipa.eu/cz/zdirka-bananek-panel-zluta/d-87879/> >
- [16] TIPA, spol. s r.o [online]. 1995-2010, [cit.2013-2-9]. Dostupné z:
< <http://www.gme.cz/plastove-krabicky-pristrojove/u-kp03-p622-403/> >
- [17] Uni-Trend Group Limited [online]. 2004, [cit.2013-5-1]. Dostupné z:
< <http://www.uni-trend.com/UTD3152CE.html> >
- [18] Uni-Trend Group Limited [online]. 2004, [cit.2013-5-1]. Dostupné z:
< <http://www.uni-trend.com/ut70a.html> >
- [19] Uni-Trend Group Limited [online]. 2004, [cit.2013-5-1]. Dostupné z:
< <http://www.uni-trend.com/UT603.html> >